

**This Page Is Inserted by IFW Operations  
and is not a part of the Official Record**

## **BEST AVAILABLE IMAGES**

**Defective images within this document are accurate representations of the original documents submitted by the applicant.**

**Defects in the images may include (but are not limited to):**

- **BLACK BORDERS**
- **TEXT CUT OFF AT TOP, BOTTOM OR SIDES**
- **FADED TEXT**
- **ILLEGIBLE TEXT**
- **SKEWED/SLANTED IMAGES**
- **COLORED PHOTOS**
- **BLACK OR VERY BLACK AND WHITE DARK PHOTOS**
- **GRAY SCALE DOCUMENTS**

**IMAGES ARE BEST AVAILABLE COPY.**

**As rescanning documents *will not* correct images,  
please do not report the images to the  
Image Problem Mailbox.**

## EUROPEAN PATENT OFFICE

## Patent Abstracts of Japan

PUBLICATION NUMBER : 2000164926  
PUBLICATION DATE : 16-06-00

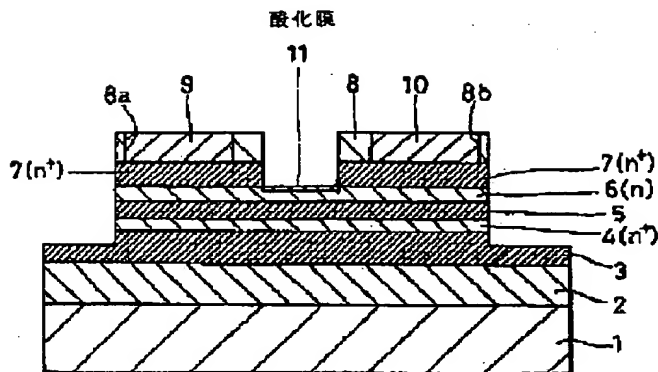
APPLICATION DATE : 24-11-98  
APPLICATION NUMBER : 10332466

APPLICANT : SONY CORP;

INVENTOR : KAWAI HIROHARU;

INT.CL. : H01L 33/00 H01L 21/205 H01L 21/306  
H01L 29/778 H01L 21/338 H01L 29/812  
H01S 5/323

TITLE : SELECTIVE ETCHING OF COMPOUND  
SEMICONDUCTOR, SELECTIVE  
ETCHING OF NITRIDE COMPOUND  
SEMICONDUCTOR, AND  
SEMICONDUCTOR DEVICE AND ITS  
MANUFACTURE



ABSTRACT : PROBLEM TO BE SOLVED: To etch a nitride compound semiconductor or a compound semiconductor selectively with respect to a base by oxidizing the surface of the nitride compound semiconductor which includes aluminum or the compound semiconductor including aluminum at or prior to etching and then etching the nitride compound semiconductor or the semiconductor in vapor phase thermochemically.

SOLUTION: With the use of etching gas which is a mixture of a first gas comprising halogen gas and halogen compound gas, a second gas comprising at least one of hydrogen gas and inactive gas, and an oxidizing gas, etching is conducted thermochemically with a compound semiconductor which includes aluminum as a base layer. For example, after a SiO<sub>2</sub> film 8 in a gate electrode formation region is removed, thermochemically etching is conducted, using an etching gas which is a mixed gas of HCl and N<sub>2</sub> including O<sub>2</sub>. When an n<sup>+</sup>-type GaN layer 7 is etched and thereby an n-type AlGa<sub>0.5</sub>N layer 6 in a lower layer is exposed, the layer 6 is oxidized with O<sub>2</sub>, thereby an oxide film 11 is formed and etching is formed stopper completely.

COPYRIGHT: (C)2000,JPO

(19) 日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11) 特許出願公開番号

特開2000-164926

(P2000-164926A)

(43) 公開日 平成12年6月16日 (2000. 6. 16)

(51) Int.Cl. <sup>7</sup>	識別記号	F I	テマコード* (参考)
H 0 1 L 33/00		H 0 1 L 33/00	C 5 F 0 0 4
21/205		21/205	5 F 0 4 1
21/306		H 0 1 S 3/18	6 7 3 5 F 0 4 5
29/778		H 0 1 L 21/302	P 5 F 0 7 3
21/338		29/80	H 5 F 1 0 2
審査請求 未請求 請求項の数54 O L (全 16 頁) 最終頁に続く			

(21) 出願番号 特願平10-332466

(22) 出願日 平成10年11月24日 (1998. 11. 24)

(71) 出願人 000002185

ソニー株式会社

東京都品川区北品川6丁目7番35号

(72) 発明者 河合 弘治

東京都品川区北品川6丁目7番35号 ソニー株式会社内

(74) 代理人 100082762

弁理士 杉浦 正知

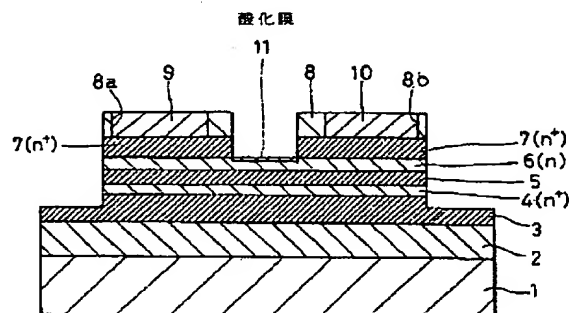
最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 化合物半導体の選択エッチング方法、窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法、半導体装置および半導体装置の製造方法

## (57) 【要約】

【課題】 A1 を含まない窒化物系化合物半導体を、下地に対してほぼ完全に選択的にエッチングすることができ、しかもエッチングの際に損傷を伴わない窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法、この方法を用いて製造される半導体装置およびその製造方法を提供する。

【解決手段】 C1<sub>2</sub> ガスなどのハロゲンガスおよび H C1 ガスなどのハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと H<sub>2</sub> ガスおよび N<sub>2</sub> ガスなどの不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと O<sub>2</sub> ガスなどの酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、A1 を含む窒化物系化合物半導体を下地層として A1 を含まない窒化物系化合物半導体を気相で熱化学的にエッチングする。



## 【特許請求の範囲】

【請求項1】 ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含む化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項2】 ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項3】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと水素との化合物のガスであることを特徴とする請求項2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項4】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと炭素との化合物のガスであることを特徴とする請求項2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項5】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと水素と炭素との化合物のガスであることを特徴とする請求項2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項6】 上記第1のガスは塩化水素ガスであり、上記第2のガスは窒素ガスであることを特徴とする請求項2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項7】 上記エッチングガスは活性窒素を放出する化合物のガスをさらに含むことを特徴とする請求項2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項8】 上記活性窒素を放出する化合物はアンモニアであることを特徴とする請求項7記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項9】 上記活性窒素を放出する化合物はアミン化合物であることを特徴とする請求項7記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項10】 上記酸化性ガスは酸素、水蒸気、二酸化イオウおよび酸化窒素のうちの少なくとも一種のガスを含むことを特徴とする請求項2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項11】 550℃以上900℃以下の温度で上記エッチングを行うようにしたことを特徴とする請求項2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項12】 600℃以上800℃以下の温度で上記エッチングを行うようにしたことを特徴とする請求項

2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項13】 上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体は $Al_x In_y Ga_{1-x-y} N$ （ただし、 $0.02 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y < 1$ ）であり、上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体は $Ga_{1-z} In_z N$ （ただし、 $0 \leq z \leq 1$ ）であることを特徴とする請求項2記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項14】 ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項15】 ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された窒化物系化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項16】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと水素との化合物のガスであることを特徴とする請求項15記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項17】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと炭素との化合物のガスであることを特徴とする請求項15記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項18】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと水素と炭素との化合物のガスであることを特徴とする請求項15記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項19】 上記第1のガスは塩化水素ガスであり、上記第2のガスは窒素ガスであることを特徴とする請求項15記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項20】 上記エッチングガスは活性窒素を放出する化合物のガスをさらに含むことを特徴とする請求項15記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項21】 上記活性窒素を放出する化合物はアンモニアであることを特徴とする請求項20記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項22】 上記活性窒素を放出する化合物はアミン化合物であることを特徴とする請求項20記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項23】 550℃以上900℃以下の温度で上

記エッチングを行うようにしたことを特徴とする請求項15記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項24】 600℃以上800℃以下の温度で上記エッチングを行うようにしたことを特徴とする請求項15記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項25】 上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体は $Al_x In_y Ga_{1-x-y} N$ （ただし、 $0.02 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y < 1$ ）であり、上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体は $Ga_{1-z} In_z N$ （ただし、 $0 \leq z \leq 1$ ）であることを特徴とする請求項15記載の窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法。

【請求項26】 ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含む化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項27】 ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項28】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと水素との化合物のガスであることを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項29】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと炭素との化合物のガスであることを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項30】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと水素と炭素との化合物のガスであることを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項31】 上記第1のガスは塩化水素ガスであり、上記第2のガスは窒素ガスであることを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項32】 上記エッチングガスは活性窒素を放出する化合物のガスをさらに含むことを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項33】 上記活性窒素を放出する化合物はアンモニアであることを特徴とする請求項32記載の半導体装置の製造方法。

【請求項34】 上記活性窒素を放出する化合物はアミン化合物であることを特徴とする請求項32記載の半導体装置の製造方法。

【請求項35】 上記酸化性ガスは酸素、水蒸気、二酸化イオウおよび酸化窒素のうちの少なくとも一種のガスを含むことを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項36】 550℃以上900℃以下の温度で上記エッチングを行うようにしたことを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項37】 600℃以上800℃以下の温度で上記エッチングを行うようにしたことを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項38】 上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体は $Al_x In_y Ga_{1-x-y} N$ （ただし、 $0.02 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y < 1$ ）であり、上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体は $Ga_{1-z} In_z N$ （ただし、 $0 \leq z \leq 1$ ）であることを特徴とする請求項27記載の半導体装置の製造方法。

【請求項39】 ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項40】 ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された窒化物系化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする半導体装置の製造方法。

【請求項41】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと水素との化合物のガスであることを特徴とする請求項40記載の半導体装置の製造方法。

【請求項42】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと炭素との化合物のガスであることを特徴とする請求項40記載の半導体装置の製造方法。

【請求項43】 上記ハロゲン化合物ガスはハロゲンと水素と炭素との化合物のガスであることを特徴とする請求項40記載の半導体装置の製造方法。

【請求項44】 上記第1のガスは塩化水素ガスであり、上記第2のガスは窒素ガスであることを特徴とする請求項40記載の半導体装置の製造方法。

【請求項45】 上記エッチングガスは活性窒素を放出する化合物のガスをさらに含むことを特徴とする請求項40記載の半導体装置の製造方法。

【請求項46】 上記活性窒素を放出する化合物はアンモニアであることを特徴とする請求項45記載の半導体

装置の製造方法。

【請求項47】 上記活性窒素を放出する化合物はアミン化合物であることを特徴とする請求項45記載の半導体装置の製造方法。

【請求項48】 550℃以上900℃以下の温度で上記エッチングを行うようにしたことを特徴とする請求項40記載の半導体装置の製造方法。

【請求項49】 600℃以上800℃以下の温度で上記エッチングを行うようにしたことを特徴とする請求項40記載の半導体装置の製造方法。

【請求項50】 上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体は  $Al_x In_y Ga_{1-x-y} N$  (ただし、 $0.02 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y < 1$ ) であり、上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層は  $Ga_{1-z} In_z N$  (ただし、 $0 \leq z \leq 1$ ) であることを特徴とする請求項40記載の半導体装置の製造方法。

【請求項51】 アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体からなり、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された下地層と、

上記下地層上のアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層とを有し、

上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層はエッチングにより形成された端面を有し、かつ、上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層で覆われている部分の上記下地層の上面と上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層で覆われていない部分の上記下地層の上面とが連続的につながっていることを特徴とする半導体装置。

【請求項52】 上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体は  $Al_x In_y Ga_{1-x-y} N$  (ただし、 $0.02 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y < 1$ ) であり、上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層は  $Ga_{1-z} In_z N$  層 (ただし、 $0 \leq z \leq 1$ ) であることを特徴とする請求項51記載の半導体装置。

【請求項53】 アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された窒化物系化合物半導体層と、上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体層上のアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層とを有し、

上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層はエッチングにより形成された端面を有し、かつ、上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層で覆われている部分の上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体層の上面と上記アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層で覆われていない部分の上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体層の上面とが連続的につながっていることを特徴とする半導体装置。

【請求項54】 上記アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体層は  $Al_x In_y Ga_{1-x-y} N$  (ただし、 $0.02 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y < 1$ ) であり、上記アルミニウム

を含まない窒化物系化合物半導体層は  $Ga_{1-z} In_z N$  層 (ただし、 $0 \leq z \leq 1$ ) であることを特徴とする請求項53記載の半導体装置。

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】この発明は、化合物半導体の選択エッチング方法、窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法、半導体装置および半導体装置の製造方法に関し、特に、GaNなどの窒化物系III-V族化合物半導体を用いた半導体装置に適用して好適なものである。

【0002】

【従来の技術】GaN系半導体は直接遷移半導体であり、その禁制帯幅は1.9eVから6.2eVに亘っており、可視領域から紫外線領域の発光が可能な発光素子の実現が理論上可能であることから、近年注目を集めており、その開発が活発に進められている。また、GaN系半導体は、電子走行素子の材料としても大きな可能性を持っている。すなわち、GaNの飽和電子速度は約  $2.5 \times 10^7$  cm/sとSi、GaAsおよびSiCに比べて大きく、また、破壊電界は約  $5 \times 10^6$  V/cmとダイヤモンドに次ぐ大きさを持っている。このような理由により、GaN系半導体は、高周波、大電力用半導体素子の材料として大きな可能性を持つことが予想されてきた。

【0003】しかしながら、GaN系半導体を用いて電子走行素子を作る場合には、不純物のイオン注入による導電層の形成という手法を適用することができない点で、GaAs系半導体などを用いた従来の半導体素子と大きく異なる。すなわち、GaN系半導体中にイオン注入された不純物は熱的アニールによっても活性化されないため、例えばGaN系半導体を用いたFETにおいては、キャリア濃度が実用上十分に高いソース領域およびドレイン領域を形成することができず、したがってソース電極およびドレイン電極をそれぞれソース領域およびドレイン領域に低接触抵抗でオーミック接触させることができない。

【0004】このため、GaN系半導体を用いたFETとしては、不純物のイオン注入による導電層の形成という手法を用いない、図20に示すような構造のFETが試作されている (Appl. Phys. Lett., 62(15), 1786(1993))。図20に示すように、このFETにおいては、c面サファイア基板101上にアンドープGaN層102およびチャネル層としてのn型GaN層103が順次積層され、n型GaN層103上にゲート電極104、ソース電極105およびドレイン電極106が設けられている。ここで、ゲート電極104はn型GaN層103とショットキー接触し、ソース電極105およびドレイン電極106はn型GaN層103とオーミック接触している。

【0005】また、Ga<sub>N</sub>系半導体を用いた場合には、不純物のイオン注入による導電層の形成という手法を適用することができないという上述の困難に加え、Ga<sub>N</sub>系半導体に対しては有効なウェットエッチング液がまだ開発されておらず、通常の酸またはアルカリを用いたウェットエッチング技術では、全くと言ってよいほどエッチングされないという困難もある。このため、Ga<sub>N</sub>系半導体を用いたFETにおいては、GaAs系半導体を用いたFETにおいてソース抵抗低減のために用いられる、いわゆるリセスゲート構造を良好に形成することは困難であった。ここで、物理的モードの大きな条件での反応性イオンエッチング(RIE)法を用いれば、リセスゲート構造を形成することは一応可能であるが、このRIE法では、被エッチング層や下地に損傷が生じてしまうばかりでなく、選択エッチングが困難であるため、被エッチング層をエッチングしようとするとその下地までエッチングせざるを得ないという問題があり、実際上適用は困難である。

【0006】一方、Ga<sub>N</sub>系半導体を用いた高電子移動度トランジスタ(High Electron Mobility Transistor, HEMT)として、図21に示すような構造のAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTが試作されている(Appl. Phys. Lett., 68(4), 22(1996))。図21に示すように、このAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTにおいては、c面サファイア基板201上にアンドープGa<sub>N</sub>層202、電子走行層としてのアンドープGa<sub>N</sub>層203および電子供給層としてのn型AlGa<sub>N</sub>層204が順次積層され、n型AlGa<sub>N</sub>層204上にゲート電極205、ソース電極206およびドレイン電極207が設けられている。ここで、ゲート電極205はn型AlGa<sub>N</sub>層204とショットキー接触している。

【0007】しかしながら、この図21に示すAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTにおいては、ソース電極206およびドレイン電極207が低電子濃度のn型AlGa<sub>N</sub>層204上に形成されていることや、AlGaAs/GaAs HEMTにおけるようにソース電極およびドレイン電極の下側にオーミック接触用の合金層を形成することが困難であることなどにより、ソース電極206およびドレイン電極207の接触抵抗が極めて高い。このため、このAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> HEMTの性能は低かった。

【0008】また、図22に示すような構造のAlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub>接合を用いたFETも試作されている(Appl. Phys. Lett., 69(6), 794(1996))。図22に示すように、このFETにおいては、c面サファイア基板301上にアンドープGa<sub>N</sub>層302、電子走行層としてのn型Ga<sub>N</sub>層303、スペーサ層としてのアンドープAlGa<sub>N</sub>層304および電子供給層としてのn型AlGa<sub>N</sub>層305が順次積層され、n型AlGa<sub>N</sub>層305上にゲート電極306、ソース電極307およびドレイン

電極308が設けられている。ここで、ゲート電極306はn型AlGa<sub>N</sub>層305とショットキー接触しており、ソース電極307およびドレイン電極308はn型AlGa<sub>N</sub>層305とオーミック接触している。このFETは、HEMTと類似の構造を有するが、ドーピングされた層であるn型Ga<sub>N</sub>層303を電子走行層に用いていることが通常のHEMTと異なる。

【0009】しかしながら、この図22に示すFETにおいては、ソース電極307およびドレイン電極308はn型AlGa<sub>N</sub>層305上に形成されているために接触抵抗が十分に低くないことなどにより、高性能のものが得られていない。

【0010】また、Ga<sub>N</sub>系半導体を用いたFETとしては、図23に示すようなものも試作されている(Appl. Phys. Lett., 65(9), 1121(1994))。図23に示すように、このFETにおいては、c面サファイア基板401上に電子走行層としてのn型Ga<sub>N</sub>層402および電子供給層としてのn型AlGa<sub>N</sub>層403が順次積層されている。n型AlGa<sub>N</sub>層403は所定形状にパターニングされている。そして、このn型AlGa<sub>N</sub>層403上にゲート電極404が設けられているとともに、このn型AlGa<sub>N</sub>層403の両側壁にそれぞれ接触するようにソース電極405およびドレイン電極406がn型Ga<sub>N</sub>層402上に設けられている。ここで、ゲート電極404はn型AlGa<sub>N</sub>層403とショットキー接触し、ソース電極405およびドレイン電極406はn型Ga<sub>N</sub>層402およびn型AlGa<sub>N</sub>層403とオーミック接触している。このFETは、HEMTと類似の構造を有するが、ドーピングされた層であるn型Ga<sub>N</sub>層402を電子走行層に用いていることが通常のHEMTと異なる。

【0011】しかしながら、この図23に示すFETにおいては、n型AlGa<sub>N</sub>層403のパターニングにRIE法のような物理的エッチング法を用いざるを得ないことから、このn型AlGa<sub>N</sub>層403および下地のn型Ga<sub>N</sub>層402に損傷が生じてしまい、素子特性の劣化をもたらすという問題がある。

【0012】一方、Ga<sub>N</sub>系半導体を用いた半導体レーザにおいては、GaAs系半導体を用いた半導体レーザにおいてしきい値電流低減のために用いられる、いわゆるリッジ構造を良好に形成することは、Ga<sub>N</sub>系半導体を用いたFETにおいてリセスゲート構造を良好に形成することが困難であるのと同様な理由により、困難であった。

【0013】

【発明が解決しようとする課題】以上のように、Ga<sub>N</sub>系半導体を用いた電子走行素子や半導体レーザの製造においては、Ga<sub>N</sub>系半導体に固有の問題、すなわち選択エッチングが困難であることや不純物のイオン注入による導電層の形成が困難であることなどに起因する多くの

課題があり、その解決が望まれていた。

【0014】この発明は、これらの課題を一挙に解決するものである。すなわち、この発明の目的は、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を、下地に対してほぼ完全に選択的にエッチングすることができ、しかもエッチングの際に損傷を伴わない窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法ならびにそのような選択エッチング方法を用いて製造される半導体装置およびその製造方法を提供することにある。

【0015】この発明はまた、より一般的に、アルミニウムを含まない化合物半導体を、下地に対してほぼ完全に選択的にエッチングすることができ、しかもエッチングの際に損傷を伴わない化合物半導体の選択エッチング方法およびそのような選択エッチング方法を用いた半導体装置の製造方法を提供することにある。

【0016】

【課題を解決するための手段】本発明者は、従来の技術が有する上述の課題を解決すべく鋭意検討を行った結果、Ga<sub>2</sub>NやGaInNなどのアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を下地に対してほぼ完全に選択的にエッチングすることができ、しかもエッチングの際に損傷を伴わない窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法を得ることができれば、上述の課題を一挙に解決することができることに着目し、種々の実験を経てその具体的な方法を見出した。また、さらなる検討の結果、同様な手法は、窒化物系化合物半導体と同様な性質を示す化合物半導体であれば、同様に適用することができるという結論に至った。この発明は、これらの知見および検討に基づいて案出されたものである。

【0017】すなわち、上記目的を達成するために、この発明の第1の発明は、ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含む化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする化合物半導体の選択エッチング方法である。

【0018】この発明の第2の発明は、ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法である。

【0019】この発明の第3の発明は、ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少な

くとも一方からなる第2のガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする化合物半導体の選択エッチング方法である。

【0020】この発明の第4の発明は、ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された窒化物系化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする窒化物系化合物半導体の選択エッチング方法である。

【0021】この発明の第5の発明は、ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含む化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする半導体装置の製造方法である。

【0022】この発明の第6の発明は、ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスと酸化性ガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする半導体装置の製造方法である。

【0023】この発明の第7の発明は、ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたことを特徴とする半導体装置の製造方法である。

【0024】この発明の第8の発明は、ハロゲンガスおよびハロゲン化合物ガスのうちの少なくとも一方からなる第1のガスと水素ガスおよび不活性ガスのうちの少なくとも一方からなる第2のガスとの混合ガスからなるエッチングガスを用い、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された窒化物系化合物半導体を下地層としてアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体を選択的に熱化学的にエッチングするようにしたこ



とを特徴とする半導体装置の製造方法である。

【0025】ここで、第1のガスとして用いられるハロゲンガスまたはハロゲン化合物ガスは、エッチング温度でハロゲンを分離するものであれば、基本的にはどのようなものであってもよい。具体的には、ハロゲンガスは $X_2$  ( $X=F, Cl, Br$ )である。また、ハロゲン化合物ガスは、ハロゲンと水素との化合物のガス(ハイドライドガスの一種)、具体的には $HX$  ( $X=F, Cl, Br$ )や、ハロゲンと炭素との化合物、具体的には例えば $CX_4$  ( $X=F, Cl, Br$ )や、ハロゲンと水素と炭素との化合物のガス、具体的には例えば $CH_3X$  ( $X=F, Cl, Br$ )などである。第2のガスとして用いられる不活性ガスは、具体的には $N_2$ 、 $Ar$ 、 $Xe$ 、 $He$ などのガスである。さらに、エッチングの際の窒化物系化合物半導体あるいは他の化合物半導体の面荒れを防止するためには、好適には、これらのガスに加えて、活性窒素を放出する化合物のガスを含ませる。この活性窒素を放出する化合物は、具体的には、例えば、アンモニアやアミン化合物である。アミン化合物は、具体的には、トリメチルアミン、ジメチルアミン、ジエチルアミンなどである。また、酸化性ガスとしては、種々のものを用いることができるが、具体的には、例えば、酸素( $O_2$ )、水蒸気( $H_2O$ )、二酸化イオウ( $SO_2$ )および酸化窒素( $NO_x$ )のうちの少なくとも一種類のガスを含むものを用いることができる。この酸化性ガスは、例えば、アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体の表面に数原子層以上の厚さのアルミニウム酸化物を主成分とする酸化膜が形成される量が最低限あればよく、一般には極微量で足りる。エッチング前にアルミニウムを含む窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体の表面に酸化膜を形成する場合には、酸化性ガスを含む雰囲気中での熱処理やプラズマ酸化などを行うことにより酸化膜を形成する。

【0026】また、エッチングは、必要なエッチング速度が得られ、かつ、被エッチング物および下地層である窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体の結晶の破壊、結晶性の劣化、面荒れなど、すなわち損傷が生じない範囲の温度で行う。特に、被エッチング物および下地層が窒化物系III-V族化合物半導体である場合には、エッチングは、典型的には、 $550^{\circ}C$ 以上 $900^{\circ}C$ 以下の温度で行う。ここで、エッチングを $550^{\circ}C$ よりも低い温度で行うとエッチング速度が小さすぎ、エッチングを $900^{\circ}C$ よりも高い温度で行うと被エッチング物および下地層である窒化物系III-V族化合物半導体の損傷が生じてしまう。十分なエッチング速度を得るとともに、被エッチング物および下地層である窒化物系III-V族化合物半導体の損傷を有効に抑えるために、このエッチングは、好適には、 $600^{\circ}C$ 以上 $800^{\circ}C$ 以下の温度で行う。

【0027】この発明の第9の発明は、アルミニウムを

含む窒化物系化合物半導体からなり、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された下地層と、下地層上のアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層とを有し、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層はエッチングにより形成された端面を有し、かつ、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層で覆われている部分の下地層の上面とアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層で覆われていない部分の下地層の上面とが連続的につながっていることを特徴とする半導体装置である。

【0028】この発明の第10の発明は、アルミニウムを含み、かつ、表面の少なくとも一部が酸化された窒化物系化合物半導体層と、アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体層上のアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層とを有し、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層はエッチングにより形成された端面を有し、かつ、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層で覆われている部分のアルミニウムを含む窒化物系化合物半導体層の上面とアルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体層で覆われていない部分のアルミニウムを含む窒化物系化合物半導体層の上面とが連続的につながっていることを特徴とする半導体装置である。

【0029】この発明において、典型的には、アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体は $Al_xIn_yGa_{1-x-y}N$  (ただし、 $0.02 \leq x \leq 1$ 、 $0 \leq y < 1$ )であり、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体は $Ga_{1-z}In_zN$  (ただし、 $0 \leq z \leq 1$ )である。上記のような典型的な窒化物系化合物半導体以外の化合物半導体としては、例えば、 $N$ を含む化合物半導体、具体的には、例えば、 $BGaInPN$ 、 $BGaInAsN$ 、 $BGaInAsPN$ などが挙げられる。

【0030】上述のように構成されたこの発明においては、エッチングガス中に含まれるハロゲンの作用により、気相で熱化学的に、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体がエッチングされる。これに対し、アルミニウムを含む窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体は、エッチングガス中に含まれる酸化性ガスにさらされたとき、あるいは、エッチング前に酸化が行われたときに、それに含まれるアルミニウムが酸化されてその表面に形成される酸化膜の作用により実質的にエッチングされない。すなわち、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体を、下地であるアルミニウムを含む窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体に対して、ほぼ完全に選択的にエッチングすることができる。また、このエッチングの際には、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体およびアルミニウムを含む窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体に損傷が生じるのを防止することができる。さらに、エッチング速度は主に温度で制御されるので、エッチングの制御性が良

好である。

【0031】

【発明の実施の形態】以下、この発明の実施形態について図面を参照しながら説明する。

【0032】以下の実施形態においては、c面サファイア基板上にGa<sub>2</sub>N、AlGa<sub>2</sub>N、GaIn<sub>2</sub>Nなどの窒化物系III-V族化合物半導体からなる層を積層した構造を用いるが、まず、これらの窒化物系III-V族化合物半導体を有機金属化学気相成長(MOCVD)法により成長させる一般的な方法について説明する。

【0033】これらの窒化物系III-V族化合物半導体の成長の際の原料ガスとしては、Ga原料としてトリメチルガリウム(TM<sub>3</sub>G)、Al原料としてトリメチルアルミニウム(TMA)、In原料としてトリメチルインジウム(TM<sub>3</sub>In)、N原料としてアンモニア(NH<sub>3</sub>)、n型不純物のドーパントとしてシラン(SiH<sub>4</sub>)、p型不純物のドーパントとしてシクロペンタジエニルマグネシウム(Cp<sub>2</sub>Mg)を用いる。そして、よく知られているように、まず、c面サファイア基板上に低温でAlNまたはGa<sub>2</sub>Nからなるバッファ層を成長させた後、NH<sub>3</sub>ガスを流しながら成長温度を1000℃前後に上昇させ、バッファ層上にGa<sub>2</sub>N、AlGa<sub>2</sub>Nなどを成長させる。ここで、GaIn<sub>2</sub>NなどのInを含む窒化物系III-V族化合物半導体を成長させる場合には、成長温度を700～800℃に下げ、雰囲気ガスは窒素(N<sub>2</sub>)とすることも、よく知られている。

【0034】次に、Ga<sub>2</sub>Nのエッチング速度の測定結果について説明する。このエッチング速度の測定のための試料は、次のようにして作製した。まず、c面サファイア基板上にAlNまたはGa<sub>2</sub>Nからなる低温成長によるバッファ層を成長させた後、このバッファ層上に厚さ5μmのGa<sub>2</sub>N層を成長させる。次に、このGa<sub>2</sub>N層上にストライプ形状を有するSiO<sub>2</sub>膜からなるマスクを形成する。次に、このc面サファイア基板を反応炉に導入する。次に、O<sub>2</sub>を0.1%含むN<sub>2</sub>ガスにHClガスを所定の割合で混合したエッチングガスを反応炉内に100～200cc/minの流量で流し、600～800℃の温度で5～60分間、試料をエッチングガスにさらした。

【0035】図1は、HClを10%含むエッチングガスを100cc/minの流量で流しながら700℃でGa<sub>2</sub>N層のエッチングを行ったときのエッチング時間とエッチング深さとの関係を示す。図2は、同一条件におけるエッチング温度(T)とエッチング速度との関係を示す。

【0036】図2より、HClによるGa<sub>2</sub>Nのエッチングは化学反応によるものであり、その反応の活性化エネルギーは1.43eVであること、エッチング速度は温度により、1nm/min(600℃)から20nm/min(800℃)以上まで制御することができること

がわかる。また、図1より、エッチングには時間遅れがなく、時間によってエッチング深さを精密に制御することができることがわかる。

【0037】次に、AlGa<sub>2</sub>Nのエッチング速度の測定結果について説明する。このエッチング速度の測定のための試料は、次のようにして作製した。まず、c面サファイア基板上にAlNまたはGa<sub>2</sub>Nからなる低温成長によるバッファ層を成長させた後、このバッファ層上にGa<sub>2</sub>N層を成長させ、引き続いてこのGa<sub>2</sub>N層上に厚さ0.5μmのAlGa<sub>2</sub>N層を成長させる。次に、このAlGa<sub>2</sub>N層上にストライプ形状を有するSiO<sub>2</sub>膜からなるマスクを形成する。次に、このc面サファイア基板を反応炉に導入する。次に、O<sub>2</sub>を0.1%含むN<sub>2</sub>ガスにHClガスを所定の割合で混合したエッチングガスを反応炉内に100～200cc/minの流量で流し、600～800℃の温度で5～60分間、試料をエッチングガスにさらした。これらの試料のAlGa<sub>2</sub>N層のAl組成比は7%、15%および50%の3水準に変えた。一方、比較のために、c面サファイア基板上にバッファ層を介してGa<sub>2</sub>N層を成長させた試料を別に用意し、この試料も同時にエッチングガスにさらした。

【0038】まず、HClを5%含むエッチングガスを100cc/minの流量で流しながら700℃で10分間AlGa<sub>2</sub>N層のエッチングを試みたところ、3個の試料のいずれも、AlGa<sub>2</sub>N層はまったくエッチングされなかった。これに対し、同時にエッチングガスにさらした別の試料のGa<sub>2</sub>N層の表面の段差の高さを測定したところ、約55nmであった。すなわち、Ga<sub>2</sub>N層は約55nmエッチングされた。

【0039】次に、HClを10%含むエッチングガスを100cc/minの流量で流しながら800℃で30分間AlGa<sub>2</sub>N層のエッチングを試みたところ、やはり、3個の試料のいずれも、AlGa<sub>2</sub>N層はほとんどエッチングされなかった。これに対し、同時にエッチングガスにさらした別の試料のGa<sub>2</sub>N層は、約1.6μmエッチングされた。

【0040】上述のようにしてエッチングを試みたAlGa<sub>2</sub>N層の表面を走査型電子顕微鏡(SEM)により観察したところ、SiO<sub>2</sub>マスクで覆われた領域とSiO<sub>2</sub>膜マスクで覆われていない領域とは、コントラストとしてかなり区別することができる程度で、明確な段差は見られなかった。

【0041】上述のように、この実験では、Ga<sub>2</sub>N層が約1.6μmエッチングされても、Al組成比が7%のAlGa<sub>2</sub>N層、すなわちAl<sub>0.07</sub>Ga<sub>0.93</sub>N層はエッチングされない。このAlGa<sub>2</sub>N層の耐エッチング性の理由は基本的には表面にHClに対して非常に安定なAl酸化物が形成されるからであると考えられるが、極めて微量のAlの添加でも大きなエッチング耐性を発揮する理由は今のところ解明されていない。

【0042】次に、この発明の第1の実施形態によるAlGaNGaNHEMTの製造方法について説明する。

【0043】この第1の実施形態においては、まず、図3に示すように、c面サファイア基板1上に、AlNまたはGaNからなるバッファ層（図示せず）を介して、アンドープGaN層2、アンドープAlGaNGaN層3、n型不純物として例えばSiがドーパされたn<sup>+</sup>型AlGaNGaN層4、アンドープGaN層5、n型不純物として例えばSiがドーパされたn型AlGaNGaN層6およびn型不純物として同様にSiがドーパされたn<sup>+</sup>型GaNGaN層7を順次成長させる。ここで、アンドープGaN層5は電子走行層、n<sup>+</sup>型AlGaNGaN層4およびn型AlGaNGaN層6は電子供給層である。また、アンドープAlGaNGaN層3の厚さは例えば300nm、n<sup>+</sup>型AlGaNGaN層4の厚さは例えば5nm、アンドープGaN層5の厚さは例えば15nm、n型AlGaNGaN層6の厚さは例えば15nm、n<sup>+</sup>型GaNGaN層7の厚さは例えば150nmである。

【0044】次に、図4に示すように、例えばCVD法によりn<sup>+</sup>型GaNGaN層7の全面に例えば厚さが0.4μmのSiO<sub>2</sub>膜8を形成した後、このSiO<sub>2</sub>膜8をリソグラフィーおよびエッチングにより所定のストライプ形状にパターンニングする。このSiO<sub>2</sub>膜8で覆われていない部分が素子分離領域となる。このSiO<sub>2</sub>膜8のエッチングには、例えば、フッ酸系エッチング液を用いたウェットエッチング法またはフッ素系エッチングガスを用いたRIE法を用いる。

【0045】次に、SiO<sub>2</sub>膜8をエッチングマスクとして、例えばRIE法により、アンドープAlGaNGaN層3に達するまでエッチングする。このときのエッチング深さは例えば0.35μmである。

【0046】次に、図5に示すように、リソグラフィーによりソース電極およびドレイン電極形成用の所定形状のレジストパターン（図示せず）を形成した後、このレジストパターンをエッチングマスクとしてSiO<sub>2</sub>膜8をエッチングすることにより開口8a、8bを形成する。次に、例えば真空蒸着法により全面に例えばTi/Al/Au膜（図示せず）を形成する。次に、このレジストパターンをその上に形成されたTi/Al/Au膜とともに除去する（リフトオフ）。これによって、開口8a、8bの部分におけるn<sup>+</sup>型GaNGaN層7上にそれぞれソース電極9およびドレイン電極10が形成される。この後、ソース電極9およびドレイン電極10の接触抵抗を低くするために、例えば、N<sub>2</sub>雰囲気、800℃、10分の条件でアニールを行う。

【0047】次に、図6に示すように、リソグラフィーおよびエッチングにより、ゲート電極形成領域のSiO<sub>2</sub>膜8を除去した後、HClとO<sub>2</sub>を0.1%含むN<sub>2</sub>との混合ガスからなり、HClを10%含むエッチング

ガスを用いて、700℃で50分間、熱化学エッチングを行う。このときのn<sup>+</sup>型GaNGaN層7のエッチング深さは約0.15μmである。この場合、このn<sup>+</sup>型GaNGaN層7がエッチングされて下層のn型AlGaNGaN層6が露出した時点でこのn型AlGaNGaN層6の表面がエッチングガス中に含まれるO<sub>2</sub>にさらされて酸化され、Al酸化物を主成分とする酸化膜11が形成されることによりこのエッチングは完全に停止し、したがってこのn型AlGaNGaN層6は全くエッチングされない。

【0048】次に、図7に示すように、n型AlGaNGaN層6の表面に形成された酸化膜11を、例えば、フッ酸系のエッチング液や、150～450℃の温度のリン酸またはリン酸と硫酸とを主成分とするエッチング液を用いてエッチング除去する。

【0049】次に、例えばCVD法により全面に例えば厚さが0.3μmのSiO<sub>2</sub>膜を形成した後、RIE法によりエッチバックする。これによって、図8に示すように、ゲート電極形成領域におけるn<sup>+</sup>型GaNGaN層6およびSiO<sub>2</sub>膜8の側壁にSiO<sub>2</sub>からなるサイドウォールスペーサ12が形成される。

【0050】次に、リソグラフィーによりゲート電極形成用の所定形状のレジストパターン（図示せず）を形成した後、例えば真空蒸着法により全面に例えばTi/Au膜を形成する。次に、レジストパターンをその上に形成されたTi/Au膜とともに除去する。これによって、図9に示すように、n型AlGaNGaN層6とショットキー接触したゲート電極13が形成される。

【0051】以上により、目的とするAlGaNGaNHEMTが製造される。

【0052】このAlGaNGaNHEMTにおいては、電子走行層であるアンドープGaNGaN層5と電子供給層であるn<sup>+</sup>型AlGaNGaN層4およびn型AlGaNGaN層6との界面の近傍におけるアンドープGaNGaN層5にそれぞれ2次元電子ガス（図示せず）が存在する。

【0053】この第1の実施形態によれば、次のような種々の利点を得ることができる。すなわち、ゲート電極形成領域におけるn<sup>+</sup>型GaNGaN層7のエッチング、すなわちリセスエッチングの際には、下層のn型AlGaNGaN層6が露出した時点でエッチングが完全に停止するので、ゲート電極形成領域におけるこのn型AlGaNGaN層6の厚さの減少がなく、このため電子走行層であるアンドープGaNGaN層5とゲート電極13との間の距離をこのn型AlGaNGaN層6の厚さにより正確に規定することができる。また、このようにゲート電極形成領域におけるn<sup>+</sup>型GaNGaN層7のリセスエッチングが可能であることにより、ソース抵抗の大幅な低減を図ることができる。また、このリセスエッチングの際には、n<sup>+</sup>型GaNGaN層7およびn型AlGaNGaN層6に損傷が生じるのを防止することができる。さらに、ソース電極9およびドレイン電極10は高キャリア濃度のn<sup>+</sup>型GaNGaN層7上に形成

しているの、これらのソース電極9およびドレイン電極10の接触抵抗の大幅な低減を図ることができる。また、ゲート電極形成領域における $n^+$ 型Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層7を選択的に除去した後、この除去部の側壁にサイドウォールスペーサ12を形成してからゲート電極13を自己整合的に形成しているの、エッチングによる加工限界よりもサイドウォールスペーサ12の厚さの2倍小さい寸法にまで、ゲート長を短縮することができる。一方、このゲート電極13の上部の寸法は十分に大きくすることができるので、ゲート抵抗の大幅な低減を図ることができる。以上により、高性能、高速、大電力のAlGa<sub>0.5</sub>N/GaN HEMTを得ることができる。

【0054】次に、この発明の第2の実施形態によるリッジ型AlGa<sub>0.5</sub>N/GaInN半導体レーザの製造方法について説明する。

【0055】この第2の実施形態においては、まず、図10に示すように、c面サファイア基板21上に、AlNまたはGa<sub>0.5</sub>Nからなるバッファ層(図示せず)を介して、 $n$ 型不純物として例えばSiがドーパされた $n$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層22、 $n$ 型不純物として同様にSiがドーパされた $n$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層23、 $n$ 型不純物のGaInN活性層24、 $p$ 型不純物として例えばMgがドーパされた $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25および $p$ 型不純物として同様にMgがドーパされた $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26を順次成長させる。ここで、 $n$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層22は $n$ 側電極のコンタクト層となり、 $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26は $p$ 側電極のコンタクト層となる。 $n$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層23および $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25のAl組成比は例えば0.15、GaInN活性層24のIn組成比は例えば0.05である。また、これらの層の厚さは、例えば、 $n$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層22は4 $\mu$ m、 $n$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層23は0.5 $\mu$ m、GaInN活性層24は0.05 $\mu$ m、 $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25は0.5 $\mu$ m、 $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26は1 $\mu$ mである。

【0056】次に、例えばCVD法により $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26の全面に例えば厚さが0.3 $\mu$ mのSiO<sub>2</sub>膜(図示せず)を形成した後、このSiO<sub>2</sub>膜をリソグラフィーおよびエッチングにより例えば幅が7 $\mu$ mの所定のストライプ形状にパターンニングする。次に、このSiO<sub>2</sub>膜をエッチングマスクとして、HClと微量のO<sub>2</sub>を含むN<sub>2</sub>との混合ガスからなり、HClを10%含み、O<sub>2</sub>を0.1%含むエッチングガスを用いて、750℃で1時間、 $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26の熱化学エッチングを行う。これによって、図11に示すように、 $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26が所定のストライプ形状にパターンニングされる。この場合、この $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26がエッチングされて下層の $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25が露出した時点でこの $n$ 型AlGa<sub>0.5</sub>N層25の表面がエッチングガス中に含まれるO<sub>2</sub>にさらされて酸化され、Al酸化物を主成分とする酸化膜27が形成されることによりこのエッチングは完

全に停止し、したがってこの $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25は全くエッチングされない。したがって、 $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26で覆われている部分の $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25の上面と $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26で覆われていない部分の $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25の上面とは連続的につながっていて同一平面上にある。また、このエッチングの際には、同時に、 $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25および $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26のアニールも行われ、それらにドーパされたMgが活性化される。

【0057】次に、エッチングマスクとして用いられた上述のSiO<sub>2</sub>膜をエッチング除去した後、図12に示すように、例えばスパッタリング法により全面に例えば厚さが0.3 $\mu$ mのSiO<sub>2</sub>膜28を形成する。次に、このSiO<sub>2</sub>膜28上にリソグラフィーにより $p$ 側電極形成用の所定形状のレジストパターン(図示せず)を形成した後、このレジストパターンをエッチングマスクとしてSiO<sub>2</sub>膜28をエッチングすることにより開口28aを形成する。この開口28aの幅は例えば5 $\mu$ mである。次に、例えば真空蒸着法により全面に例えばTi/Pt/Au膜を形成した後、レジストパターンをその上に形成されたTi/Pt/Au膜とともに除去する。これによって、開口28aの部分における $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26上に $p$ 側電極29が形成される。

【0058】次に、SiO<sub>2</sub>膜28上にリソグラフィーにより例えば厚さが3 $\mu$ mの所定形状のレジストパターン(図示せず)を形成した後、このレジストパターンをエッチングマスクとして、例えばRIE法により、SiO<sub>2</sub>膜28、酸化膜27、 $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25、GaInN活性層24および $n$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層23を順次エッチングする。次に、リソグラフィーにより $n$ 側電極形成用の所定形状のレジストパターン(図示せず)を形成した後、例えば真空蒸着法により全面に例えばTi/Al/Pt/Au膜を形成する。次に、レジストパターンをその上に形成されたTi/Al/Pt/Au膜とともに除去する。これによって、 $n$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層22上に $n$ 側電極30が形成される。この後、この $n$ 側電極30の接触抵抗を低くするために、例えば、N<sub>2</sub>雰囲気、800℃、10分の条件でアニールを行う。

【0059】以上により、目的とするリッジ型AlGa<sub>0.5</sub>N/GaInN半導体レーザが製造される。

【0060】この第2の実施形態によれば、熱化学エッチングにより $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26をストライプ形状にパターンニングしていることにより、このストライプ形状の $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26からなるリッジ部を、この $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層26自身や $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25に損傷を生じることなく形成することができる。そして、このようにリッジ構造を形成することができることにより、半導体レーザのしきい値電流の低減を図ることができる。また、 $p$ 型AlGa<sub>0.5</sub>Nクラッド層25および $p$ 型Ga<sub>0.5</sub>N層

26にドーパされたMgの活性化のためのアニールをp型Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層26のパターニングのための熱化学エッチングで兼用することができることにより、この活性化のためのアニールを独立に行う必要がなくなり、したがってその分だけ半導体レーザの製造工程の簡略化を図ることができる。

【0061】次に、この発明の第3の実施形態によるAlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N/GaN HEMTの製造方法について説明する。

【0062】この第3の実施形態においては、まず、図15に示すように、c面サファイア基板1上に、AlNまたはGaNからなるバッファ層(図示せず)を介して、アンドープGaN層2、アンドープAlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層3、n型不純物として例えばSiがドーパされたn<sup>+</sup>型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層4、アンドープGaN層5およびn型不純物として例えばSiがドーパされたn型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層6を順次成長させる。次に、ゲート電極形成領域におけるn型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層6の表面を選択的に酸化することにより酸化膜11を形成する。次に、n型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層6上に、n型不純物として同様にSiがドーパされたn<sup>+</sup>型GaN層7を成長させる。ここで、アンドープGaN層5は電子走行層、n<sup>+</sup>型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層4およびn型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層6は電子供給層である。また、アンドープAlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層3の厚さは例えば300nm、n<sup>+</sup>型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層4の厚さは例えば5nm、アンドープGaN層5の厚さは例えば15nm、n型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層6の厚さは例えば15nm、n<sup>+</sup>型GaN層7の厚さは例えば150nmである。

【0063】次に、図16に示すように、例えばCVD法によりn<sup>+</sup>型GaN層7の全面に例えば厚さが0.4μmのSiO<sub>2</sub>膜8を形成した後、このSiO<sub>2</sub>膜8をリソグラフィーおよびエッチングにより所定のストライプ形状にパターニングする。このSiO<sub>2</sub>膜8で覆われていない部分が素子分離領域となる。このSiO<sub>2</sub>膜8のエッチングには、例えば、フッ酸系エッチング液を用いたウェットエッチング法またはフッ素系エッチングガスを用いたRIE法を用いる。

【0064】次に、SiO<sub>2</sub>膜8をエッチングマスクとして、例えばRIE法により、アンドープAlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層3に達するまでエッチングする。このときのエッチング深さは例えば0.35μmである。

【0065】次に、図17に示すように、リソグラフィーによりソース電極およびドレイン電極形成用の所定形状のレジストパターン(図示せず)を形成した後、このレジストパターンをエッチングマスクとしてSiO<sub>2</sub>膜8をエッチングすることにより開口8a、8bを形成する。次に、例えば真空蒸着法により全面に例えばTi/Al/Au膜(図示せず)を形成する。次に、このレジストパターンをその上に形成されたTi/Al/Au膜とともに除去する(リフトオフ)。これによって、開口

8a、8bの部分におけるn<sup>+</sup>型GaN層7上にそれぞれソース電極9およびドレイン電極10が形成される。この後、ソース電極9およびドレイン電極10の接触抵抗を低くするために、例えば、N<sub>2</sub>雰囲気、800℃、10分の条件でアニールを行う。

【0066】次に、リソグラフィーおよびエッチングにより、ゲート電極形成領域のSiO<sub>2</sub>膜8を除去した後、HClとN<sub>2</sub>との混合ガスからなり、HClを10%含むエッチングガスを用いて、700℃で50分間、熱化学エッチングを行う。このときのn<sup>+</sup>型GaN層7のエッチング深さは約0.15μmである。この場合、このn<sup>+</sup>型GaN層7がエッチングされて、下層のn型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層6の表面に形成された酸化膜11が露出した時点でこのエッチングは完全に停止し、したがってこのn型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層6は全くエッチングされない。

【0067】この後、第1の実施形態における酸化膜11の除去工程以降の工程と同様な工程を実行し、目的とするAlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N/GaN HEMTを製造する。

【0068】この第3の実施形態によれば、第1の実施形態と同様な利点を得ることができる。

【0069】次に、この発明の第4の実施形態によるリッジ型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N/GaInN半導体レーザの製造方法について説明する。

【0070】この第4の実施形態においては、まず、図18に示すように、c面サファイア基板21上に、AlNまたはGaNからなるバッファ層(図示せず)を介して、n型不純物として例えばSiがドーパされたn型Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層22、n型不純物として同様にSiがドーパされたn型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Nクラッド層23、アンドープのGaInN活性層24およびp型不純物として例えばMgがドーパされたp型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Nクラッド層25を順次成長させる。次に、リッジ部形成領域を除いた部分におけるp型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Nクラッド層25の表面を選択的に酸化することにより酸化膜27を形成する。次に、p型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Nクラッド層25上に、p型不純物として同様にMgがドーパされたp型GaN層26を成長させる。ここで、n型Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層22はn側電極のコンタクト層となり、p型GaN層26はp側電極のコンタクト層となる。n型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Nクラッド層23およびp型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Nクラッド層25のAl組成比は例えば0.15、GaInN活性層24のIn組成比は例えば0.05である。また、これらの層の厚さは、例えば、n型Ga<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>N層22は4μm、n型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Nクラッド層23は0.5μm、GaInN活性層24は0.05μm、p型AlGa<sub>0.5</sub>In<sub>0.5</sub>Nクラッド層25は0.5μm、p型GaN層26は1μmである。

【0071】次に、例えばCVD法によりp型GaN層26の全面に例えば厚さが0.3μmのSiO<sub>2</sub>膜(図示せず)を形成した後、このSiO<sub>2</sub>膜をリソグラフィーおよびエッチングにより例えば幅が7μmの所定のス

トライブ形状にパターニングする。次に、この $\text{SiO}_2$ 膜をエッチングマスクとして、 $\text{HCl}$ と $\text{N}_2$ との混合ガスからなり、 $\text{HCl}$ を10%含むエッチングガスを用いて、750℃で1時間、p型Ga $\text{N}$ 層26の熱化学エッチングを行う。これによって、図19に示すように、p型Ga $\text{N}$ 層26が所定のストライプ形状にパターニングされる。この場合、このp型Ga $\text{N}$ 層26がエッチングされて、下層のp型AlGa $\text{N}$ クラッド層25の表面に形成された酸化膜27が露出した時点でこのエッチングは完全に停止し、したがってこのp型AlGa $\text{N}$ クラッド層25は全くエッチングされない。したがって、p型Ga $\text{N}$ 層26で覆われている部分のp型AlGa $\text{N}$ クラッド層25の上面とp型Ga $\text{N}$ 層26で覆われていない部分のp型AlGa $\text{N}$ クラッド層25の上面とは連続的につながっていて同一平面上にある。また、このエッチングの際には、同時に、p型AlGa $\text{N}$ クラッド層25およびp型Ga $\text{N}$ 層26のアニールも行われ、それらにドーパされたMgが活性化される。

【0072】次に、エッチングマスクとして用いられた上述の $\text{SiO}_2$ 膜をエッチング除去した後、第2の実施形態における $\text{SiO}_2$ 膜28の形成工程以降の工程と同様な工程を実行し、目的とするリッジ型AlGa $\text{N}$ /GaIn $\text{N}$ 半導体レーザを製造する。

【0073】この第4の実施形態によれば、第2の実施形態と同様な利点を得ることができる。

【0074】以上、この発明の実施形態について具体的に説明したが、この発明は、上述の実施形態に限定されるものではなく、この発明の技術的思想に基づく各種の変形が可能である。

【0075】例えば、上述の第1～第4の実施形態において挙げた数値、構造、材料、原料、成長法などはあくまでも例に過ぎず、必要に応じてこれと異なる数値、構造、材料、原料、成長法などを用いてもよい。

【0076】具体的には、上述の第1および第3の実施形態においては、 $n^+$ 型Ga $\text{N}$ 層7にソース電極9およびドレイン電極10を接触させているが、この $n^+$ 型Ga $\text{N}$ 層7の代わりに $n^+$ 型GaIn $\text{N}$ 層を用い、この $n^+$ 型GaIn $\text{N}$ 層にソース電極9およびドレイン電極10を接触させるようにしてもよく、この場合には、ソース電極9およびドレイン電極10の接触抵抗をより低減させることができる。また、上述の第1および第3の実施形態によるAlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$  HEMTは、電子走行層であるアンドープGa $\text{N}$ 層5の上下に電子供給層であるn型AlGa $\text{N}$ 層6および $n^+$ 型AlGa $\text{N}$ 層4を設けた、いわゆるダブルドーパ型のHEMTであるが、この発明は、電子走行層であるアンドープGa $\text{N}$ 層5上に電子供給層であるn型AlGa $\text{N}$ 層6が積層された、いわゆる順HEMTや、電子供給層であるn型AlGa $\text{N}$ 層6上に電子走行層であるアンドープGa $\text{N}$ 層5が積層された、いわゆる逆HEMTとしてもよい。さらに、

電子走行層としては、アンドープGa $\text{N}$ 層5の代わりに、例えばアンドープGaIn $\text{N}$ 層を用いてもよい。

【0077】また、例えば、AlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$ の多層膜のエッチングにおいては、AlGa $\text{N}$ 層は酸化性ガスを含まないガス組成のエッチングガスでエッチングを行い、Ga $\text{N}$ 層に達したところで、エッチングガスに酸化性ガスを添加してGa $\text{N}$ 層をエッチングし、その下部のAlGa $\text{N}$ 層表面でエッチングを停止させる。これを繰り返すことにより、所望の位置のAlGa $\text{N}$ 層の表面に正確に到達させることができる。このようなデジタル的エッチングにより、高機能な素子を形成することができる。

【0078】

【発明の効果】以上説明したように、この発明によれば、エッチング時あるいはエッチング前にアルミニウムを含む窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体の表面を酸化し、気相で熱化学的にエッチングを行うので、アルミニウムを含まない窒化物系化合物半導体あるいは化合物半導体を、下地に対してほぼ完全に選択的にエッチングすることができ、しかもエッチングの際に損傷を伴わないようにすることができる。

【図面の簡単な説明】

【図1】Ga $\text{N}$ 層のエッチング時間とエッチング深さとの関係を示す略線図である。

【図2】Ga $\text{N}$ 層のエッチング温度とエッチング速度との関係を示す略線図である。

【図3】この発明の第1の実施形態によるAlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$  HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図4】この発明の第1の実施形態によるAlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$  HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図5】この発明の第1の実施形態によるAlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$  HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図6】この発明の第1の実施形態によるAlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$  HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図7】この発明の第1の実施形態によるAlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$  HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図8】この発明の第1の実施形態によるAlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$  HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図9】この発明の第1の実施形態によるAlGa $\text{N}$ /Ga $\text{N}$  HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図10】この発明の第2の実施形態によるリッジ型AlGa $\text{N}$ /GaIn $\text{N}$ 半導体レーザの製造方法を説明するための断面図である。

【図11】この発明の第2の実施形態によるリッジ型AlGaInN/GaN半導体レーザの製造方法を説明するための断面図である。

【図12】この発明の第2の実施形態によるリッジ型AlGaInN/GaN半導体レーザの製造方法を説明するための断面図である。

【図13】この発明の第2の実施形態によるリッジ型AlGaInN/GaN半導体レーザの製造方法を説明するための断面図である。

【図14】この発明の第2の実施形態によるリッジ型AlGaInN/GaN半導体レーザの製造方法を説明するための断面図である。

【図15】この発明の第3の実施形態によるAlGaInN/GaN HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図16】この発明の第3の実施形態によるAlGaInN/GaN HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図17】この発明の第3の実施形態によるAlGaInN/GaN HEMTの製造方法を説明するための断面図である。

【図18】この発明の第4の実施形態によるリッジ型AlGaInN/GaN半導体レーザの製造方法を説明する

ための断面図である。

【図19】この発明の第4の実施形態によるリッジ型AlGaInN/GaN半導体レーザの製造方法を説明するための断面図である。

【図20】従来の第1の例によるGaN系半導体を用いたFETを示す断面図である。

【図21】従来の第2の例によるGaN系半導体を用いたFETを示す断面図である。

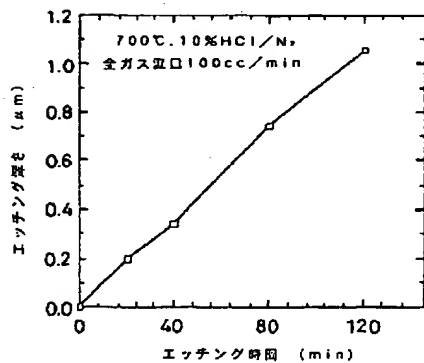
【図22】従来の第3の例によるGaN系半導体を用いたFETを示す断面図である。

【図23】従来の第4の例によるGaN系半導体を用いたFETを示す断面図である。

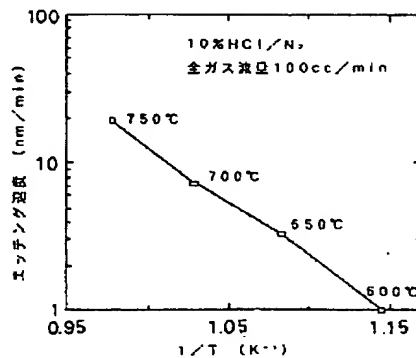
【符号の説明】

1、21・・・c面サファイア基板、2、5・・・アンダーブGaN層、3・・・アンダーブAlGaIn層、4・・・n<sup>+</sup>型AlGaIn層、6・・・n型AlGaIn層、7・・・n<sup>+</sup>型GaN層、8、27・・・SiO<sub>2</sub>膜、9・・・ソース電極、10・・・ドレイン電極、11、27・・・酸化膜、13・・・ゲート電極、22・・・n型GaN層、23・・・n型AlGaInクラッド層、24・・・GaInN活性層、25・・・p型AlGaInクラッド層、26・・・p型GaN層、29・・・p側電極、30・・・n側電極

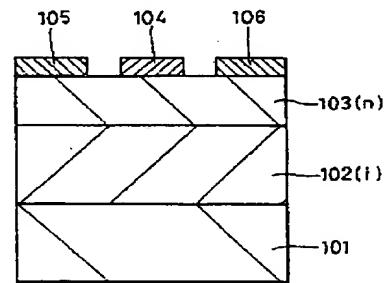
【図1】



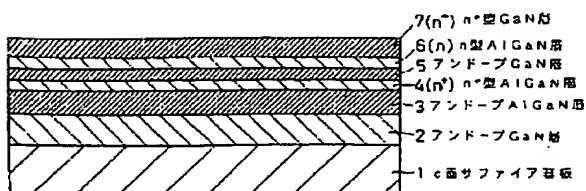
【図2】



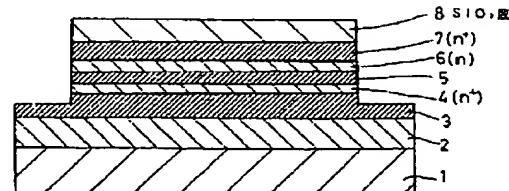
【図20】



【図3】

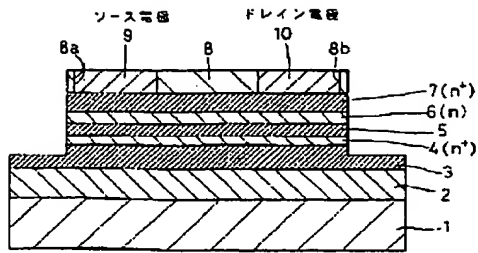


【図4】

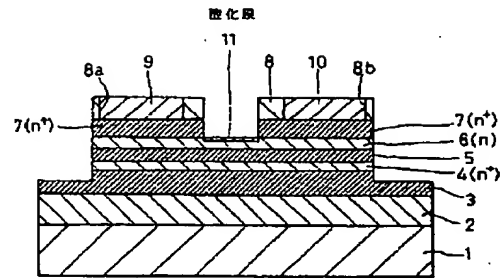




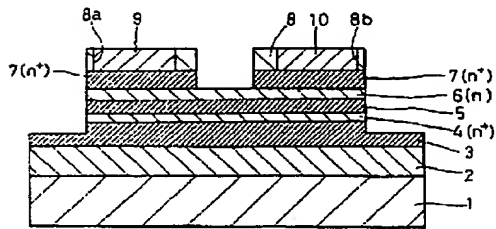
【図5】



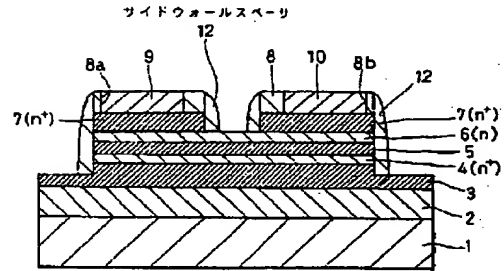
【図6】



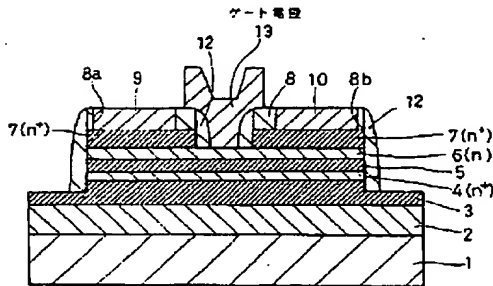
【図7】



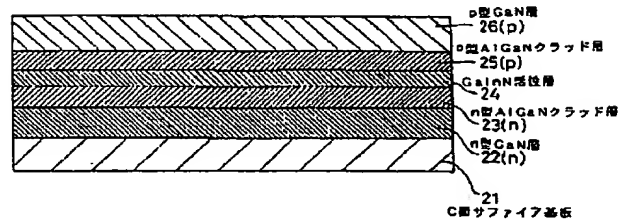
【図8】



【図9】

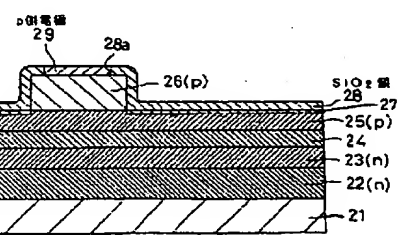
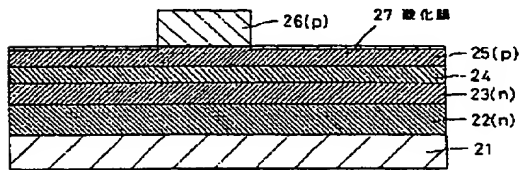


【図10】

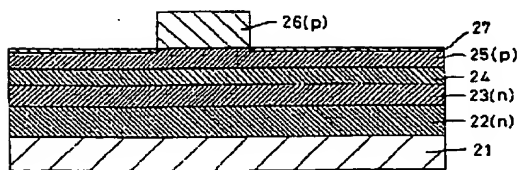


【図12】

【図11】

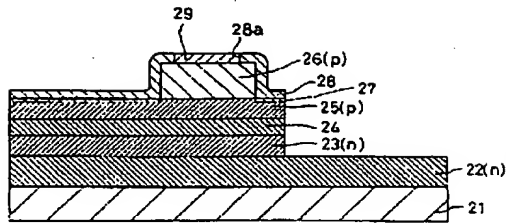


【図19】

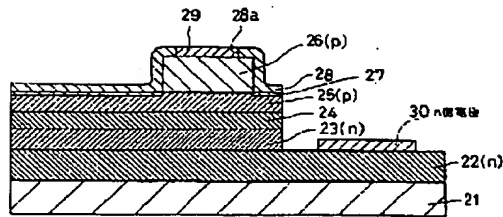




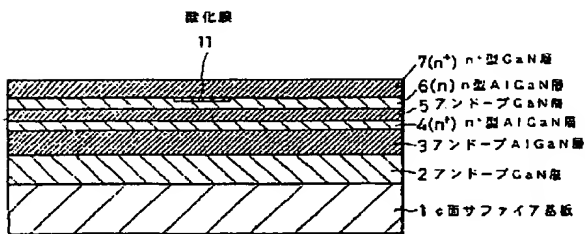
【図13】



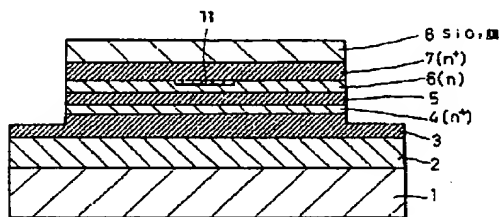
【図14】



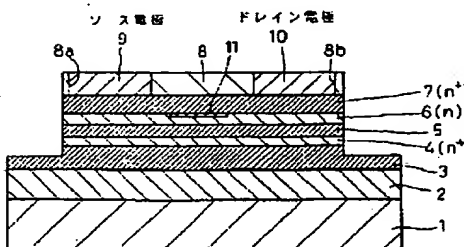
【図15】



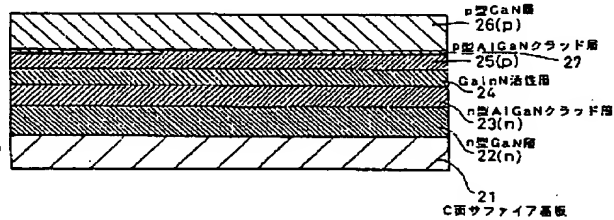
【図16】



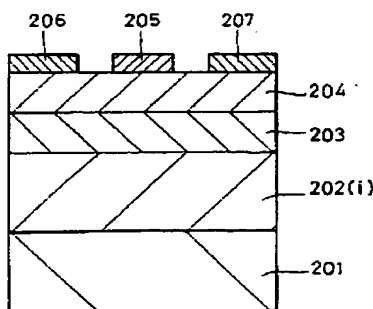
【図17】



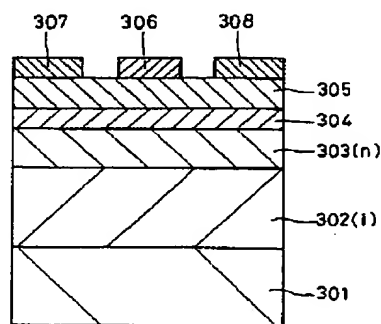
【図18】



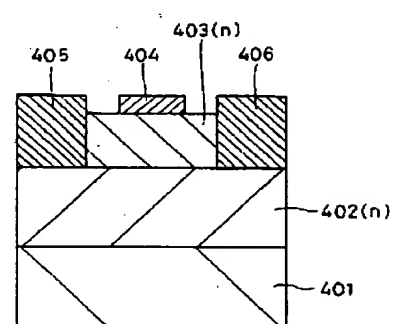
【図21】



【図22】



【図23】



フロントページの続き

(51) Int. Cl. 7

H01L 29/812

H01S 5/323

識別記号

F I

特許コード (参考)

F ターム(参考) 5F004 BA19 BB26 CA04 DA25 DA26  
DA29 DB19 EA06 EA12 EA23  
EA27 EA34  
5F041 CA34 CA40 CA46 CA65 CA74  
CA99  
5F045 AA04 AB09 AB14 AC01 AC08  
AC19 AD11 AD13 AF09 CA07  
CA10 CA12 HA13  
5F073 CA02 CA07 CA17 CB05 DA05  
DA24 DA25 DA26 DA35  
5F102 FA02 GB01 GC01 GD01 GJ10  
GK04 GL04 GM04 GM08 GQ01  
GQ03 GR01 GR04 GR09 GR10  
GT04 HC01 HC16 HC21